



Caractérisation électromagnétique des matériaux magnétiques anisotropes : vers une nouvelle approche de la détermination de la largeur de raie à mi-hauteur

Vinod V. K. Thalakkatukalathil, Alexis Chevalier, Patrick Queffelec

► To cite this version:

Vinod V. K. Thalakkatukalathil, Alexis Chevalier, Patrick Queffelec. Caractérisation électromagnétique des matériaux magnétiques anisotropes : vers une nouvelle approche de la détermination de la largeur de raie à mi-hauteur. 14èmes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux (JCMM 2016), Mar 2016, Calais, France. hal-01321049

HAL Id: hal-01321049

<https://hal.univ-brest.fr/hal-01321049>

Submitted on 24 May 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Caractérisation électromagnétique des matériaux magnétiques anisotropes : vers une nouvelle approche de la détermination de la largeur de raie à mi-hauteur

Vinod V K Thalakkatukulathil¹, A. Chevalier¹ et P. Queffelec¹

¹ Lab-STICC, UMR CNRS 6285, Université de Bretagne Occidentale, 6 avenue Le Gorgeu, CS93837, 29238 Brest Cedex 3

Vinod.Vkthalakkatukulathil@univ-brest.fr

Résumé— Cette étude présente une nouvelle méthode de caractérisation électromagnétique des ferrites aimantés, par nature anisotropes. Plutôt que de mesurer directement les éléments complexes du tenseur de perméabilité et la permittivité scalaire, nous proposons une technique large bande permettant de remonter au facteur d'amortissement. Ce paramètre est en effet essentiel à la détermination du comportement dynamique des ferrites polycristallins. Il constitue l'unique paramètre dynamique d'entrée d'un outil de simulation que nous avons développé pour l'aide à la conception des dispositifs hyperfréquences à ferrite. Les autres paramètres d'entrée étant les propriétés statiques du ferrite. La méthode large bande proposée est basée sur l'utilisation d'une ligne coaxiale. L'échantillon de ferrite est aimanté selon la direction de propagation.

Mots clés— Ferrites, tenseur de perméabilité, caractérisation électromagnétique, ligne coaxiale, largeur de raie à mi-hauteur.

I- INTRODUCTION

Les circulateurs et les isolateurs à ferrite sont des dispositifs essentiels pour de nombreuses applications en télécommunications en raison de leurs faibles pertes d'insertion dans un sens de propagation et de leur niveau d'isolation élevé dans l'autre sens. Le fonctionnement des circulateurs/isolateurs repose en effet sur la non-réciprocité de la propagation des ondes électromagnétiques (EM) dans les ferrites aimantés. Les ferrites sont également utilisés dans le domaine des hyperfréquences pour réaliser des déphaseurs ou encore des antennes miniatures en bande UHF. Un contrôle précis de la performance de ces composants nécessite la connaissance préalable du comportement dynamique des matériaux ferrites. Pour décrire pleinement la réponse dynamique des matériaux magnétiques, y compris les pertes, les composantes complexes du tenseur de perméabilité: $\mu = \mu' - j\mu''$, $\kappa = \kappa' - j\kappa''$ et la permittivité scalaire complexe, $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$, doivent être prises en considération lors de l'application des équations de Maxwell.

Sur le plan expérimental, la caractérisation EM des ferrites est réalisée couramment à l'état totalement désaimanté, par exemple à l'aide de la technique en réflexion/transmission basée sur l'utilisation d'une ligne coaxiale [1], et à l'état saturé, à partir de la mesure de la largeur de raie à mi-hauteur ΔH (ou ΔH_{eff}) en cavité résonante. La caractérisation des ferrites dans des états de partielle aimantation est moins facile. Pour ces états que l'on retrouve en pratique dans les circulateurs/isolateurs auto-polarisés, les déphaseurs et les antennes accordables, différentes techniques ont été développées au laboratoire à l'aide de guides d'ondes rectangulaires [2], de ligne microruban ou triplaqué [3]. Le principal intérêt de ces tech-

niques est lié au fait qu'elles donnent accès directement aux paramètres constitutifs des matériaux, permittivité scalaire et tenseur de perméabilité. L'inconvénient réside dans le caractère effectif des paramètres mesurés. Or, l'une des spécificités des matériaux magnétiques est la dépendance de leur réponse dynamique vis-à-vis de la forme de l'échantillon. La perméabilité d'un échantillon torique n'est pas la même que celle d'une plaque. En outre, pour les matériaux aimantés non ellipsoïdaux, ce qui est le cas de figure le plus couramment rencontré dans un dispositif à ferrite, le champ statique interne de polarisation n'est pas uniforme. Dans ces conditions, caractériser le matériau à partir d'une perméabilité effective ou moyenne ne constitue pas la solution la plus précise pour aider le concepteur de dispositifs à ferrite. Face à cette réalité, nous avons développé un outil théorique rigoureux qui permet de déterminer de manière prédictive les propriétés EM des ferrites quel que soit leur état d'aimantation et qui prend en compte l'inhomogénéité du champ interne de polarisation. Cet outil, qui associe une analyse magnétostatique du dispositif, un modèle général du tenseur de perméabilité [4] et le logiciel commercial CST Microwave Studio, a été validé pour la conception de déphaseurs [5] et celle d'antennes à ferrite [6].

La plupart des paramètres d'entrée du modèle de tenseur de perméabilité utilisé sont des propriétés statiques du ferrite (aimantation à saturation, champ d'anisotropie magnétocristalline). Un seul est dynamique, le facteur d'amortissement, qui est lié, dans le cas des ferrites saturés, à la largeur de raie à mi-hauteur que l'on mesure en général à l'aide d'un échantillon sphérique en cavité résonante [7]. Cette méthode n'est pas très pratique car il faut usiner le ferrite sous la forme d'une sphère et elle est mono-fréquence. Le résultat est obtenu en général à 9,4 GHz.

Dans cet article, nous proposons une nouvelle technique de caractérisation du facteur d'amortissement des ferrites polycristallins. L'objectif principal de la méthode proposée est de s'affranchir des contraintes liées à la mesure standard de la largeur de raie à mi-hauteur en développant une cellule large bande intégrant un échantillon torique et non plus une sphère comme avec la méthode standard. Dans un premier temps, la méthode de mesure sera présentée. Puis, l'analyse EM de la cellule sera validée par confrontation avec une analyse dynamique issue d'un simulateur commercial. Enfin les résultats expérimentaux obtenus seront discutés.

II- DESCRIPTION DE LA METHODE DE MESURE

Pour assurer le caractère large bande, la méthode utilise une ligne coaxiale au format APC7 dans laquelle est inséré l'échantillon de ferrite (cf. figure 1). L'ensemble est plongé dans l'entrefer d'un électro-aimant créant un champ statique suivant l'axe principal de la cellule, i.e. dans la direction de propagation de l'onde.

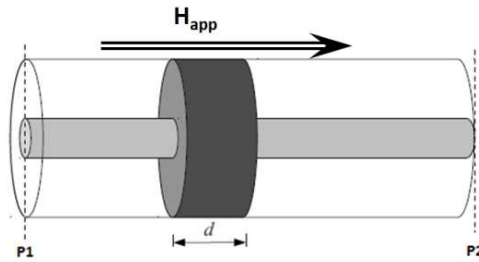


Figure 1. : direction du champ appliqué sur la cellule de mesure APC7

Les paramètres de transmission S_{21} et de réflexion S_{11} sont alors mesurés à l'aide d'un analyseur de réseau dans la bande de fréquence [130 MHz-10 GHz]. Sous l'action du champ magnétique statique, le matériau s'aimante et devient anisotrope. La cellule de mesure coaxiale étant symétrique, elle reste réciproque. Il n'est donc pas possible de remonter directement aux composantes du tenseur de perméabilité μ et κ . L'objectif de la méthode est alors de comparer les paramètres S mesurés à ceux calculés de façon théorique à partir de l'outil de modélisation que nous avons développé.

Le modèle GPT est utilisé pour modéliser le tenseur de perméabilité du matériau aimanté. L'analyse EM est celle de la cellule chargée par le ferrite aimanté proposée dans [8][9][10]. Dans cette analyse EM, seul le premier mode symétrique (quasi-TEM) est pris en compte, la constante de propagation γ est déterminée par la résolution du système d'équations des composantes du champ électrique en appliquant les conditions aux limites sur l'âme central et le conducteur extérieur. Brodwin [8] propose également une approximation du coefficient de réflexion à l'interface air-ferrite que nous avons utilisée pour calculer les paramètres S théoriques de la cellule chargée.

III- VALIDATION DE L'ANALYSE ELECTROMAGNETIQUE

Afin de valider l'analyse EM de la cellule chargée par l'échantillon ferrite, nous l'avons testée dans trois cas limites. Le cas purement diélectrique dans lequel le matériau inséré dans la cellule possède une permittivité constante et une perméabilité unité ; les paramètres S issus de l'analyse EM sont alors comparés à ceux que prédit la théorie des lignes de transmissions. Le cas désaimanté pour lequel les paramètres S issus de l'analyse EM de la cellule chargée par un ferrite désaimanté sont comparés à ceux de la réponse mesurée à l'analyseur. Enfin le cas saturé pour lequel les paramètres S issus de l'analyse EM de la cellule chargée par un ferrite saturé sont comparés à ceux prédit par le logiciel CST Microwave Studio.

La figure 2 présente la comparaison des paramètres S dans les cas limites désaimanté et saturé d'un échantillon composite fabriqué à base de poudre de grenat d'Yttrium $4\pi M_s = 800$ G de concentration proche de 70%. (le cas diélectrique montrant un parfait accord n'est pas présenté ici). Un très bon accord est observé sur toute la bande de fréquence. En particulier sur le pic d'absorption. Une légère différence est notée pour le cas saturé au voisinage de la résonance, elle peut provenir de la contribution des modes d'ordre supérieurs non pris en compte dans l'analyse EM.

Ces résultats permettent de valider l'analyse électromagnétique dans les cas limites désaimanté et saturé. Nous disposons ainsi d'un outil de modélisation de la réponse des matériaux magnétiques sous champ et nous proposons maintenant de l'appliquer aux cas partiellement aimantés

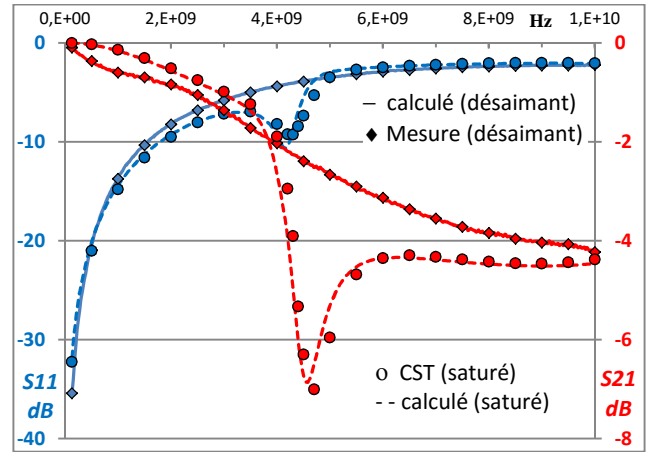


Figure 2. : comparaison des paramètres calculés (--) et simulés (● saturé) ou mesuré (▼ cas désaimanté)

IV- RESULTATS

Nous avons mesurés les paramètres S de la cellule chargée par le ferrite composite, pour des valeurs de champ magnétique statique variant de 0G à 2000G. Puis à l'aide d'une procédure d'optimisation, nous avons utilisé l'outil de simulation développé pour superposer aux courbes expérimentales, les courbes théoriques en ajustant uniquement deux paramètres : le facteur d'amortissement et le champ appliqué. En effet, le modèle suppose de connaître avec exactitude la valeur du champ interne dans l'échantillon, ce qui n'est pas simple avec la configuration de mesure choisie où seule la valeur du champ appliqué est accessible. Une des difficultés réside alors dans l'évaluation des champs démagnétisants de l'échantillon.

La figure 3 présente la comparaison des paramètres S dans les cas d'échantillon partiellement aimanté.

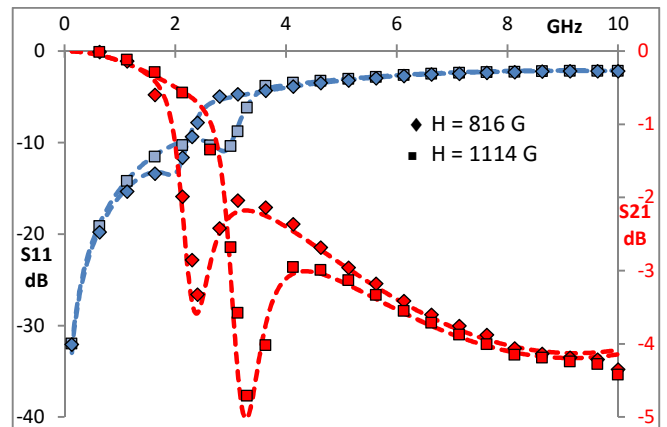


Figure 3. : comparaison des paramètres de répartition (S_{11} et S_{21}) calculés (--) et mesuré (▼ cas partiellement aimanté)

Le bon accord entre courbe théorique et expérimentales nous montre que l'outil proposé permet de modéliser correctement le comportement dynamique de la cellule de mesure contenant des échantillons ferrites également dans le cas partiellement aimanté.

La détermination des composantes du tenseur de perméabilité à partir des paramètres S n'est pas possible dans le cas de dispositif de mesure réciproque. Ainsi pour déterminer le facteur d'amortissement, nous avons choisi d'étudier l'évolution de la puissance absorbée définie par :

$$P_{\text{abs}} = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (1)$$

La figure 4 présente les résultats expérimentaux de la puissance absorbée en fonction du champ appliqué. Nous observons le décalage attendu du maximum des pertes vers les hautes fréquences et l'augmentation de son amplitude lorsque le champ statique augmente. Pour chaque valeur de champ, l'optimisation réalisée avec l'outil développé permet de superposer les courbes théoriques.

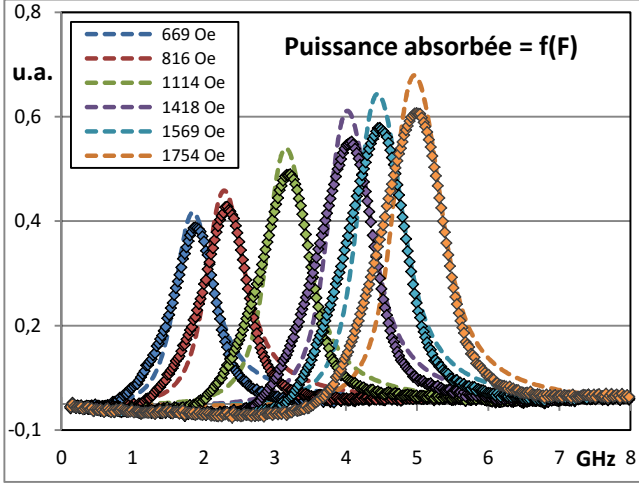


Figure 4. : évolution de la puissance absorbée mesurée (▼) et simulée (---) en fonction de la fréquence pour plusieurs valeurs de champ statique appliqué..

Une fois l'étude en champ réalisée, nous pouvons tracer pour une fréquence donnée la variation de la puissance absorbée en fonction du champ appliqué. La méthode en ligne coaxiale étant très large bande [10MHz-20GHz] nous obtenons, dans la gamme de champ étudiée, des courbes complètes pour plusieurs fréquences. Il s'agit là d'un avantage de cette méthode par rapport aux techniques en cavité résonnante mono-fréquence.

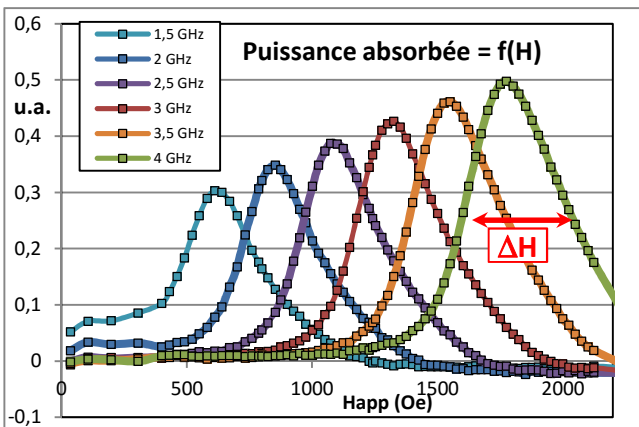


Figure 5. : évolution de la puissance absorbée mesurée en fonction du champ appliqué pour plusieurs fréquences.

Cette représentation de la puissance absorbée en fonction du champ appliqué est intéressante car elle permet de visualiser la largeur de raie d'absorption à mi-hauteur ΔH utilisée jusqu'à présent pour caractériser d'un point de vue dynamique les matériaux magnétiques.

Dans le cas où le matériau est saturé, pour lequel le modèle de Polder est applicable, il est possible en faisant quelques approximations de relier la largeur de raie d'absorption à mi-hauteur ΔH au coefficient d'amortissement α par une relation analytique simple.[11]

$$\alpha = \frac{\mu_0 \gamma \Delta H}{2\omega} \quad (2)$$

Les valeurs mesurées de la largeur à mi-hauteur et du coefficient d'amortissement sont assez élevées par rapport à celles traditionnellement observées pour les ferrites denses. Nous trouvons pour la courbe tracée à 4 GHz : $\Delta H = 445$ Oe et $\alpha = 0.156$. Ces valeurs élevées s'expliquent par l'état composite de l'échantillon pour lequel, les inhomogénéités, l'orientation aléatoire des grains ou encore les effets démagnétisants conduisent à un élargissement du spectre de puissance absorbée.

Nous avons reporté sur la figure 6 le coefficient d'amortissement calculé à partir de la relation (2) en fonction des valeurs mesurées de ΔH pour plusieurs fréquences.

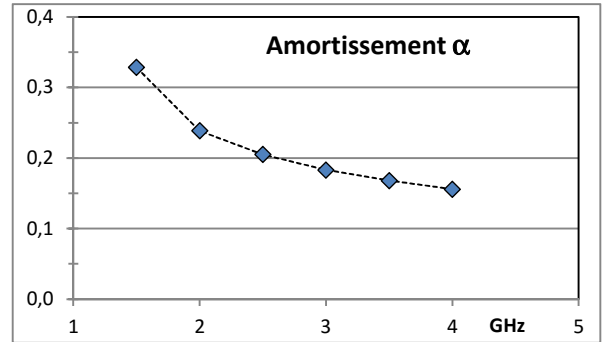


Figure 6. : évolution du coefficient d'amortissement calculé à partir des valeurs mesurées de ΔH .

Nous observons une décroissance progressive du coefficient d'amortissement en fonction de la fréquence de calcul. Cette variation n'était pas attendue. En effet, le coefficient d'amortissement α est un paramètre intrinsèque de la matière, il ne dépend ni de la fréquence ni du champ appliqué. La variation observée s'explique probablement par les hypothèses simplificatrices utilisées pour aboutir à la relation (2) qui restreignent son utilisation aux valeurs de champ pour lesquelles l'échantillon est bien saturé. Néanmoins le coefficient d'amortissement présente un comportement asymptotique pour les valeurs élevées de fréquences de travail (c'est-à-dire pour les valeurs élevées de champ appliqué) et sa valeur tend vers $\alpha = 0.15$.

Toutes les courbes présentées ci-dessus sont exprimées en fonction du champ appliqué. Or l'échantillon étant de dimensions finies, il existe des champs démagnétisants liés à sa forme. Ainsi le champ statique interne vu par les moments magnétiques dans l'échantillon est diminué du champ démagnétisant qui est fonction du coefficient de forme N :

$$H_{\text{int}} = (H_{\text{app}} + H_{\text{anis}} - N.M_s) \quad (3)$$

Corriger les effets démagnétisants n'est pas simple en particulier pour les échantillons composites. En effet, le calcul exact du coefficient de forme N n'est réalisable que dans le cas de formes ellipsoïdales et d'une aimantation uniforme.

Pour nos échantillons le coefficient démagnétisant dans la direction longitudinale dépend de l'épaisseur. Plus l'échantillon est mince, plus le coefficient démagnétisant est fort.

Dans un premier temps, afin d'estimer les effets démagnétisants macroscopiques dus à la forme de l'échantillon et non à

son caractère composite, nous avons mesuré des échantillons de ferrite dense de composition identique (céramique de grenat d'Yttrium) mais d'épaisseurs différentes 2mm, 4mm et 6mm.

La figure 7 montre l'évolution du maximum de la puissance absorbée en fonction de la fréquence pour les trois échantillons d'épaisseurs différentes. Une fois la saturation atteinte, l'évolution du maximum de la puissance absorbée est bien linéaire en fonction du champ appliqué et on retrouve une pente égale à 2.8 MHz/Oe. En effet, comme la perméabilité, la fréquence du maximum de puissance absorbée suit une loi linéaire en fonction du champ interne, contribution du champ appliqué, du champ d'anisotropie et du champ démagnétisant :

$$F_r \propto \gamma \cdot H_{\text{int}} \quad (4)$$

L'expérience montre que les trois droites ont des pentes identiques mais que leur ordonnées à l'origine différent traduisant un coefficient de forme différent. Plus l'échantillon est mince, plus le coefficient est élevé, conduisant à une ordonnée à l'origine plus faible. Le champ d'anisotropie des échantillons mesurés n'étant pas connu il est difficile de remonter à la valeur de N par cette méthode.

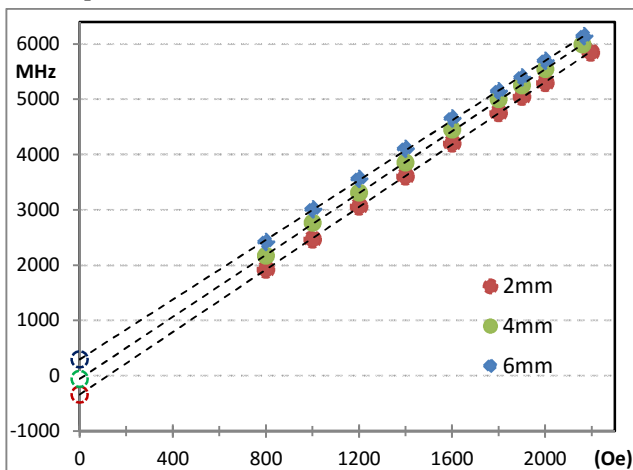


Figure 7. : évolution du maximum de la puissance absorbée en fonction du champ appliqué pour plusieurs épaisseurs d'échantillon.

Plusieurs travaux ont proposés des formulations pour calculer le coefficient démagnétisant de cylindre percé (rondelle épaisse) [12], [13] : Les calculs ne conduisent pas toujours aux mêmes résultats et il est difficile de valider des valeurs. Cependant à titre d'exemple, le tableau suivant présente les valeurs calculées pour nos échantillons APC7 ($D_e=7\text{mm}$, $D_i=3.04\text{mm}$) avec la méthode proposée en [13] :

épaisseur	2mm	4mm	6mm
N	0,562	0,356	0,243

Tableau 1 : coefficient démagnétisant de rondelle épaisse en fonction de l'épaisseur.

Ces valeurs sont cohérentes avec les résultats mesurés mais une étude plus approfondie est néanmoins nécessaire pour corriger de façon précise les effets démagnétisant et valider la valeur du champ interne nécessaire au modèle.

V-CONCLUSION

Cette approche de la mesure des pertes magnétiques en ligne coaxiale présente l'avantage d'être large bande et facile à mettre en œuvre. La méthode proposée devrait à terme permettre de caractériser les pertes magnétiques dynamiques par un paramètre unique : le facteur d'amortissement, nécessaire à l'outil de modélisation prédictif que nous avons développé.

RÉFÉRENCES :

- [1] W. B. Weir, "Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and Permeability," *Proc. IEEE*, vol. 62, no. 1, 1974.
- [2] P. Quéffelec, M. Le Floch, and P. Gelin, "New Method for Determining the Permeability Tensor of Magnetized Ferrites in a Wide Frequency Range," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 48, no. 8, pp. 1344–1351, 2000.
- [3] A. Chevalier, J. Cortes, J. Lezaca, and P. Queffelec, "Broadband permeability measurement method for ferrites at any magnetization state: Experimental results," *J. Appl. Phys.*, vol. 114, no. 17, p. 174904, 2013.
- [4] P. Gelin and P. Quéffelec, "Generalized Permeability Tensor Model: Application to Barium Hexaferrite in a Remanent State for Self-Biased Circulators," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 1, pp. 24–31, 2008.
- [5] A. Le Gouellec, G. Verissimo, P. Queffelec, V. Laur, I. Albert, and T. Girard, "Ferrite-based phase shifters design: The modeling problem of non-saturated anisotropic ferrites," *Microw. Symp. Dig. (IMS), 2013 IEEE MTT-S Int.*, pp. 1–4, 2013.
- [6] J. P. Cortes, "Développement d'un outil de simulation EM pour la conception de dispositifs accordables sur substrat magnétique application aux antennes miniatures," Thèse de doctorat de l'Université de Bretagne Occidentale, 2015.
- [7] "Measuring methods for properties of gyromagnetic materials intended for application at microwave frequencies," *IEC Stand. Publ.*, vol. IEC 60556, 1982.
- [8] M. Brodwin and D. Miller, "Propagation of the quasi-TEM mode in ferrite-filled coaxial line," *Microw. Theory Tech.*, pp. 496–503, 1964.
- [9] T. Lewis, "Propagation constant in a ferrite-filled coaxial waveguide," in *Proc. IEEE, Letters*, vol. 55, 1967, pp. 241–242.
- [10] R. S. Mueller and F. J. Rosenbaum, "Propagation in Ferrite-Filled Transmission Lines," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 16, no. 10, pp. 835–842, 1968.
- [11] D. Pozar, *Microwave engineering*, Wiley, 2009.
- [12] M. Beleggia, D. Vokoun, and M. De Graef, "Demagnetization factors for cylindrical shells and related shapes," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 321, no. 9, pp. 1306–1315, 2009.
- [13] S. G. Sandomirskii, "Calculation of short hollow cylinders under magnetization parallel to the generatrix," *Russ. Electr. Eng.*, vol. 80, no. 2, pp. 109–112, 2009.